

智慧电厂燃料全流程智能化管理系统开发研究

高杰, 马战南, 王东清

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/ADA.2025020012

摘要 : 随着全球能源结构转型与“双碳”目标的推进, 传统燃煤电厂燃料管理面临效率低下、数据离散、碳排放控制粗放等挑战。本研究聚焦智慧电厂燃料全流程智能化管理系统开发, 通过融合物联网、大数据、人工智能等技术, 构建覆盖燃料入厂验收、存储掺配、输煤程控等环节的数字化管控平台。系统采用分层架构设计, 硬件环境配置高性能服务器集群与分布式存储系统, 软件环境整合 MySQL、HBase 数据库及 Spring Boot 开发框架, 实现多源异构数据的实时采集与智能分析。功能模块涵盖燃料接卸管理、三维库存可视化、配煤掺烧优化、数字孪生决策支持等核心功能, 通过改进型遗传算法与 LSTM 神经网络模型, 将燃煤掺烧精度提升至 0.5% 以内, 热值损耗降低 12%, 碳排放强度下降 15%–20%。

关键词 : 智慧电厂; 燃料管理; 智能化系统; 物联网; 大数据分析

Research on Development of Intelligent Management System for Whole Process of Smart Power Plant Fuel

Gao Jie, Ma Zhannan, Wang Dongqing

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : With the global energy transition and the advancement of the "dual carbon" goals, traditional coal-fired power plants face challenges in fuel management such as inefficiency, data fragmentation, and coarse carbon emission control. This study focuses on developing an intelligent full-process fuel management system for smart power plants. By integrating IoT, big data, and AI technologies, we establish a digital control platform that covers all stages from fuel inspection upon arrival, storage blending, to coal transportation automation. The system adopts a layered architecture design, featuring high-performance server clusters and distributed storage systems in the hardware environment, while integrating MySQL and HBase databases with the Spring Boot development framework in the software environment to achieve real-time collection and intelligent analysis of multi-source heterogeneous data. Core functional modules include fuel unloading management, 3D inventory visualization, coal blending optimization, and digital twin decision support. Through improved genetic algorithms and LSTM neural network models, the system has reduced coal blending accuracy to within 0.5%, decreased calorific value loss by 12%, and lowered carbon emission intensity by 15%–20%.

Keywords : smart power plant; fuel management; intelligent system; internet of things; big data analysis

引言

随着全球能源结构转型加速和“双碳”目标的推进, 传统燃煤电厂燃料管理面临的效率低下、数据离散、碳排放控制粗放等问题日益突出。当前我国火力发电量仍占总发电量的 60% 以上, 燃煤燃料管理作为火电厂运营的核心环节, 其智能化水平直接关系到能源利用效率与环保效益^[1]。基于系统动力学构建的非化石能源扩张模型表明, 优化燃料管理流程可显著提升清洁能源占比, 这与我国构建新型电力系统的战略方向高度契合。

一、相关理论

(一) 智慧电厂基础理论

智慧电厂作为能源行业数字化转型的重要方向, 是以信息网

络为基础、技术创新为驱动, 面向发电生产高质量发展的新型生产模式。其核心内涵体现在对发电全生命周期的智能感知、实时分析与优化决策能力, 通过深度融合新一代信息技术与发电生产流程, 实现生产运行、设备管理、经营决策等环节的全面智慧

化。从技术特征来看，智慧电厂具备显著的智能化、信息化和集成化特点：智能化体现在基于大数据分析人工智能技术的自主决策能力，能够实现设备状态预测、故障诊断及运行优化；信息化特征则表现为通过物联网、5G等技术构建的全域感知网络，形成覆盖燃料入厂、存储、计量、配煤等全流程的数字化映射；集成化特点则通过信息-物理系统（CPS）架构实现，将物理发电设备与虚拟数字系统进行双向交互，形成跨系统、跨层级的协同管控体系。在发展趋势方面，智慧电厂建设正朝着体系化架构演进，逐步形成涵盖设备层、边缘层、平台层和应用层的四层架构体系，其中边缘层通过边缘计算节点实现数据实时处理，平台层构建工业互联网平台支撑多源数据融合，应用层则开发面向燃料管理、能耗优化等场景的智能化应用^[2]。

（二）燃料管理理论

燃料管理作为发电企业生产活动的重要环节，直接关系到电厂运行的经济性、安全性和可持续发展能力。在电力行业转型升级的背景下，燃料管理的目标已从传统的库存管控逐步转向通过智能化技术实现全过程优化。其核心目标包括保障燃料供应的稳定性、降低采购与存储成本、提升燃烧效率及减少环境污染^[3]。基于燃料特性、供应周期和生产需求的动态匹配，燃料管理需遵循安全优先、效益导向和低碳发展的基本原则。在电厂生产系统中，燃料管理不仅承担着燃料采购、接卸、存储及调配的全流程管控功能，还通过数据驱动的决策支持系统优化资源配置，为机组经济运行提供关键支撑。当前，随着智能传感、物联网和大数据技术的深度应用，燃料管理系统正朝着无人化、可视化和智能化方向演进。以煤场管理为例，通过建立智能数字化煤场管理系统，可构建三维可视化管控平台，实现堆取料机的无人精准操作和煤场无人值守，从而显著提升作业安全性和存储效率。

二、系统开发方案设计

（一）硬件与软件环境设计

系统开发方案设计需构建涵盖硬件与软件环境的综合性技术框架，以满足燃料全流程智能化管理的实时性、可靠性及扩展性需求。硬件环境方面，系统开发需要构建高可用性和高可靠性的基础设施平台，具体包括服务器集群、存储系统、网络设备及终端设备。服务器配置采用多核处理器与大容量内存架构，主控服务器建议选用双路至强处理器（如 Intel Xeon E5-2600 系列），内存容量不低于 256GB，并配置 RAID 10 冗余存储阵列以保障数据安全。存储系统采用分布式存储架构，结合高性能 SSD 硬盘与机械硬盘混合组网，实现热数据与冷数据的分级存储管理，总存储容量根据电厂年燃料吞吐量预测动态扩展，初始规划不低于 100TB^[4,5]。网络设备部署千兆工业以太网交换机与光纤骨干网络，关键节点配置冗余链路以消除单点故障风险，同时通过 VLAN 划分实现燃料管理、监控及办公网络的物理隔离。终端设备涵盖工业控制计算机、移动终端及智能感知终端，其中移动终端需支持 5G 通信协议以保障现场数据采集的实时性，智能终端包括 RFID 读写器、红外测温仪及智能称重设备，其接口协议需与系

统主站兼容。

（二）功能模块设计

本系统功能模块设计基于燃料全流程管理需求，采用分层架构模式构建核心功能单元，实现业务流程的数字化、自动化与智能化。燃料接卸管理模块以车辆调度与质量控制为核心，通过 RFID 射频识别技术与自动称重系统实现车辆入场信息采集，结合皮带秤、采样机等自动化设备完成燃料接卸全流程数据采集。系统通过数据库实时存储车辆信息、批次编号、皮重/毛重数据及采样结果，并与质检模块联动完成燃料质量判定。该模块采用事件驱动架构，通过消息队列实现实时数据推送，确保各环节操作的同步性与可追溯性。

燃料管理系统功能架构



三、系统实现与测试

（一）系统测试方法

本研究采用多层次、多维度的测试方法对系统进行科学验证，确保其功能、性能及稳定性满足工程应用需求。测试流程严格遵循 V 模型，覆盖单元测试、集成测试、系统测试及用户验收测试四个阶段。在测试方法选择上，针对不同模块特性采取差异化策略：对于燃料管理核心算法采用黑盒测试与白盒测试相结合的方式，重点验证逻辑正确性与边界条件处理能力；对物联网设备交互模块采用协议一致性测试与模拟仿真测试，确保传感器数据采集精度及通信协议兼容性；对 Web 端界面功能则采用自动化测试工具进行 UI 自动化测试，验证用户操作流程的完整性和响应效率。所有测试均基于 IEEE 829 标准构建测试用例库，共计设计有效测试用例 328 条，其中功能测试用例 216 条、性能测试用例 58 条、安全测试用例 54 条^[6]。

测试执行采用自动化测试与人工验证相结合的方式。自动化测试覆盖率达 78%，主要通过 Selenium 实现 UI 层测试、Postman 验证 RESTful API 接口，以及自研的算法测试脚本验证核心逻辑。人工测试聚焦于系统交互逻辑和异常处理场景，例如燃料运输车辆 GPS 轨迹偏移报警、燃料质检数据异常回退等特殊工况的响应能力。测试结果表明：系统功能模块测试通过率 98.5%，其中燃料配比优化算法在 1000 组仿真数据中的预测误差控制在 $\pm 1.2\%$ 以内；系统在 200TPS 并发压力下平均响应时间稳定在 1.8 秒，数据库连接池最大占用率 65%；安全测试发现的 12 个中低风险

险漏洞经修复后复测全部通过。

(二) 系统优化与改进

系统实现与测试阶段基于前期设计框架完成了全流程智能化管理系统的核心功能开发，并通过模拟环境与实测数据相结合的方式对系统性能进行多维度验证。测试过程中发现部分模块在数据处理效率、算法响应速度及人机交互流畅性方面存在优化空间。研究团队针对测试数据中的关键指标进行深度分析，通过技术迭代与架构调整实现了系统性能全面提升。

在算法优化方面，针对燃料配煤优化模块计算耗时较长的问题，引入改进型遗传算法替代原有传统算法。新算法采用动态种群规模控制策略与自适应交叉变异概率机制，通过设置多目标优化权重参数，将计算复杂度从 $O(n^2)$ 降至 $O(n \log n)$ 。实测表明，在相同算例条件下，改进算法平均运算时间缩短 42%^[7]，且最优解收敛精度提升至 98.7%。同时，对燃料库存预测模块的 LSTM 神经网络模型进行轻量化改造，通过特征筛选与注意力机制融合，有效减少冗余参数 35%，使预测响应时间从 12 秒降至 5 秒以内，预测准确率维持在 92% 以上^[8]。

四、结论

本研究针对传统电厂燃料管理中存在的信息孤岛、流程冗余及决策滞后等问题，系统构建了覆盖燃料全流程的智能化管理平台。通过多维度技术集成与业务流程重构，成功实现了燃料从接卸、存储、配煤到入炉的全链条数字化管控。系统基于物联网感知技术，在燃料接收环节部署智能采样装置与质量检测系统，结合三维激光扫描技术实时采集燃料物理特性参数，数据采集精度较传统方式提升 42%，有效解决了人工采样的主观偏差问题。在存储管理方面，通过建立燃料场三维数字化模型，结合气象数据与热值衰减预测算法，实现了燃料堆垛的动态优化布局，使燃料损耗率降低至 0.8% 以下，显著优于行业平均 1.5% 的水平^[9,10]。配煤优化系统采用改进型遗传算法与深度强化学习模型，融合锅炉燃烧特性、环保排放要求及经济性指标，构建了多目标动态优化模型，成功将燃煤掺烧经济性提升 6.3%，同时 SO_2 排放浓度稳定控制在超低排放标准限值内。

参考文献

- [1] 何鲤军. 三维可视化技术在火电厂设备数据管理中的应用 [J]. 数字技术与应用, 2022, 40(11): 40-42.
- [2] 王海. 基于数据挖掘的大型燃煤电厂智能燃料质量检测系统 [J]. 自动化与仪表, 2025, 40 (03): 92-95+101.
- [3] 马晨曦, 陈建平, 柴硕, 杨睿, 杜金刚, 赵轩, 王涛. 基于电厂燃料管理系统的数据库迁移方案 [J]. 热力发电, 2024, 53 (11): 112-118.
- [4] 毕景智, 辛超, 谷树朋. 某电厂机组燃料控制设计优化与分析 [J]. 电站系统工程, 2024, 40 (03): 64-65+68.
- [5] 王学琛, 冯丽. 智慧燃料管控系统在生物质电厂的研究与应用 [A] 2024 中国工业设备智能运维技术大会论文集 (下) [C]. 中国机械工业联合会、中国机电装备维修与改造技术协会, 中国石化出版社有限公司, 2024: 2.
- [6] 崔凯, 李信, 闫聪. 电厂燃料管理系统智能化技术探析 [J]. 电力设备管理, 2024, (20): 113-115.
- [7] 郭宝群. 电厂燃料和输煤系统节能指标分析及提升对策 [J]. 电器工业, 2023, (12): 70-74.
- [8] 段炜江. 发电厂燃料系统的安全风险与应对措施 [J]. 集成电路应用, 2022, 39 (07): 174-175.
- [9] 曹依琼. 试论电厂燃料输煤系统运行安全管理 [J]. 技术与市场, 2022, 29 (03): 193-194.
- [10] 李军海, 贝运忠, 沈涛. 基于采购经济测算模型的智慧燃料系统开发 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2021, (21): 58-60.